

https://doi.org/10.51885/3134-8009_IJS_2026_3_1

XFTAP 55.19.13

ТИТАННЫҢ ЖОҒАРЫ ЖЫЛДАМДЫҚТЫ ФРЕЗЕРЛЕУ ПРОЦЕСІН ЗЕРТТЕУ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ ТИТАНА

RESEARCH OF HIGH-SPEED MILLING OF TITANIUM

С.С. Айнабекова ^{1*}, С.О. Тусупова ², Н.Ю. Кузьмина ¹, А.Е. Ибраева ¹

¹Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау қ., Қазақстан

²Торайғыров университеті, Павлодар қ., Қазақстан

*Жауапты автор: Айнабекова Сауле Серикбаевна, e-mail: s.aynabekova@ttu.edu.kz

Түйінді сөздер:

Қиын өңделетін
материалдар, титан, титан
қорытпалары, жоғары
жылдамдықты фрезерлеу,
тәжірибені жоспарлау,
модельдеу, кесу
режимдері, регрессия
теңдеулері.

ТҮЙІНДЕМЕ

Бұл жұмыста BT1-0 маркалы титанның жоғары жылдамдықты шектік фрезерлеу нәтижелері келтірілген. Зерттеу титан мен оның қорытпаларын өңдеу тиімділігін жоғарлатуға, бөлшектердің қажетті өнімділігін қамтамасыз етуге, сондай-ақ кесу параметрлерінің өңдеу сапасына әсерін анықтауға бағытталды. Кесу режимдерінің материал сапасына әсерін зерттеу үшін Deform-3D Machining бағдарламалық кешенінде жоспарлау және модельдеу әдісімен эксперименттер жүргізілді. Жұмыстың өзектілігі материал бетінің сапа параметрлерін болжау және оңтайландыру мақсатында эксперименттерді жоспарлау әдісіне негізделген механикалық өңдеу процестерінің статистикалық тұрғыдан негізделген математикалық регрессиялық модельдерін әзірлеу және қолданумен айқындалады.

Шпиндельдің айналу жиілігі 3500-ден 12000 айн/мин аралығында жоғары жылдамдықты фрезерлеу кезінде BT1-0 маркалы титанның беткі қабатының кедір-бұдырлығы мен қаттылығының өзгеруін болжауға мүмкіндік беретін регрессиялық модельдер анықталды. Бұл модельдер белгілі тәсілдермен адекваттылығы мен дәлдігіне тексеруден өтті. Титанды жоғары жылдамдықты фрезерлеу процесін модельдеу зерттелетін материалда да, кесу құралында да температураның таралуын, кесу күштерінің өзгеруін және өңдеу процесінің кернеулі деформацияланған күйін көрсетті. Фрезерлеу барысында титан үлгісінің температурасы титанның балқу температурасынан асып түседі, соның нәтижесінде кесіліп алынатын металл кесу аймағынан ұшқын түрінде шығарылады. Құралдағы температураның да өсу сипатты байқалады, алайда майлау-салқындату сұйықтығының әсерінен құралдың дайындамамен жанасу жағынан шығу кезінде оның аздап салқындауы орын алады. Регрессия теңдеуінің коэффициенттері кедір-бұдырлық пен қаттылыққа күшті әсер ететін факторлардың беріліс шамасы мен шпиндельдің айналу жылдамдығы екенін көрсетеді, себебі олардың абсолюттік мәндері ең жоғары.



Ключевые слова:

Труднообрабатываемые материалы, титан, титановые сплавы, высокоскоростное фрезерование, планирование эксперимента, моделирование, режимы резания, уравнение регрессии.

АННОТАЦИЯ

В данной работе представлены результаты исследования высокоскоростного торцевого фрезерования титана марки BT1-0. Исследование заключалось в повышении эффективности обработки титана и его сплавов для обеспечения требуемых эксплуатационных характеристик деталей, а также влияние параметров резания на качество обработки. Для изучения влияния режимов резания на качество материала проведены эксперименты методом планирования и моделирование в программном комплексе Deform-3D Machining. Актуальность работы основана на разработке и использовании статистически обоснованных математических регрессионных моделей процессов механической обработки на основе метода планирования экспериментов, для прогнозирования и оптимизации параметров качества поверхности материала.

Определены регрессионные модели, позволяющие прогнозировать изменение шероховатости поверхности и твердости титана марки BT1-0 при высокоскоростном фрезеровании при частоте вращения шпинделя от 3500 до 12000 об/мин. Данные модели прошли проверку на адекватность и точность известными способами. Моделирование высокоскоростного фрезерования титана, показало распределение температуры как в исследуемом материале, так и в инструменте, изменение сил резания и напряженно-деформированного состояния процесса обработки. Температура титанового образца при фрезеровании превышает температуры плавления титана, что выводит срезаемый металл из зоны резания в виде искр. Температура в инструменте также имеет возрастающий характер, но под влиянием смазочно-охлаждающей жидкости в процессе выхода из контакта имеет место не большое остывание инструмента. Коэффициенты уравнения регрессии показывают, что наиболее сильное влияние на шероховатость и твердость оказывает подача и скорость вращения шпинделя, так как они имеют наибольшее по абсолютной величине значение.

keywords:

Hard-to-machine materials, titanium, titanium alloys, high-speed milling, experimental planning, modeling, cutting modes, regression equation.

ABSTRACT

This paper presents the results of study on high-speed end milling of titanium grade BT1-0. The study focused on improving the efficiency of processing titanium and its alloys to ensure the required performance characteristics of the parts, as well as the impact of the cutting parameters on the quality of the processing. To study the effect of cutting conditions using the design of experiments method and modeling in the Deform-3D Machining software package. The relevance of the work is based on the development and use of statistically grounded mathematical regression models of mechanical machining processes, based on the experimental design method, for predicting and optimizing the quality parameters of the material surface.

Regression models have been developed to predict changes in the surface roughness and hardness of BT1-0 titanium during high-speed milling at spindle speeds ranging from 3,500 to 12,000 rpm. These models have been tested for adequacy and accuracy using well-known methods. Modeling of high-speed milling of titanium showed the temperature distribution both in the material under study and in the tool, as well as changes in cutting forces and the stress-strain state of the

machining processes. The temperature of the titanium sample during milling exceeds the melting point of titanium, which causes the cut metal to be ejected from the cutting zone in the form of sparks. The temperature in the tool also increases, but due to the influence of the cutting fluid, there is a slight cooling of the tool as it exits the contact area. The coefficients of the regression equation show that the feed and spindle rotation speed have the strongest influence on roughness and hardness, as they have the highest absolute value.

КІРІСПЕ

Қазіргі машина жасаудың қарқынды даму жағдайында титан мен оның қорытпаларын қоса алғанда, қиын өңделетін материалдарды механикалық өңдеудің әртүрлі технологияларының тиімділігін арттыру мәселесі ерекше өзектілікке ие болып отыр. Сонымен қатар, мұндай бөлшектерді өңдеудің технологиялық процестерін күрделендіру процесі байқалады. Бұл процес беткі қабат сапасына, өнімділігіне, технологияның экономикалық тиімділігіне қойылатын талаптармен сипатталады (Козлов, 2022).

Қазақстанда, басқа елдердегідей, көптеген машина жасау кәсіпорындарында титан қорытпаларын кесу процесі едәуір айтарлықтай материалдық шығындармен және өндірістік өнімділіктің төмендігімен сипатталады, бұл өндірістік процестердің тиімділігін төмендетіп, өндірісті ұйымдастыруды қиындатады. Аталған мәселе титан материалдарының жоғары қаттылыққа, беріктікке және тұтқырлыққа ие болуымен қатар, олардың жылу өткізгіштігінің төмен болуына байланысты туындайды. Бұл қасиеттер механикалық өңдеу процесін едәуір қиындатып, кескіш құралдың (Anil Kumar және басқ., 2021, Zahid және басқ., 2025) қарқынды тозуына алып келеді. Осыған байланысты, қиын өңделетін материалдарды, соның ішінде титан қорытпаларын өңдеудің арнайы әдістерін қолдану қажеттілігі артып келеді. Сонымен қатар технологиялық параметрлер мен өңдеу сапасының шығу көрсеткіштері арасындағы өзара байланыстарын анықтаумен қатар, кескіш және өңдеу құралдарын жетілдіру де маңызды міндеттердің бірі болып табылады (Wang және басқ., 2020).

Көптеген жылдар бойы титан қорытпалары мен басқа да қиын өңделетін материалдарды механикалық өңдеу әдістерін шолу және салыстыруға арналған ғылыми зерттеулер санының тұрақты өсуі байқалады. Бұл аталған ғылыми бағыттың өзектілігін айқын көрсетеді. Мұның бәрі өнеркәсіптік өндірісте практикалық маңызға ие болып, аталған саладағы ғылыми ізденістерді одан әрі дамытуға кең мүмкіндіктер ашады.

Кар және басқ. (2020) өз жұмыстарында жоғары жылдамдықты бүйірлік, спиральды және соңғы фрезерлеу әдістеріне шолу жасаған. Авторлар әртүрлі қиын өңделетін металдарды өңдеу барысында кесу режимдерінің технологиялық параметрлерінің өңдеу процесінің тиімділігіне әсерін математикалық модельдеу және оңтайландыру әдістері арқылы зерттеген. Сонымен қатар, кескіш құралдың төзімділігін арттыру мақсатында криогендік салқындатуды қолдану, сондай-ақ өңделген беттің сапасын жақсарту үшін тозуға төзімді жабынмен қапталған кескіш құралдарды пайдалану мәселелері талданған. Аталған зерттеулердің нәтижелері басқа заманауи ғылыми еңбектердің қорытындыларымен бірге (Sivarupan және басқ., 2024, Matuszak және басқ., 2023) жоғары жылдамдықты фрезерлеу кезінде процестің өнімділігіне, өңдеу сапасына және кескіш құралдың төзімділігіне негізгі әсер ететін факторларды айқындауға мүмкіндік береді. Оларға кесу режимдері, кескіш құралдар және олардың жабындары, сондай-ақ өңдеу барысындағы жылулық және трибологиялық жағдайлар жатады. Кесу режимдерін оңтайлы таңдау, заманауи жабындар мен керамикалық кескіш материалдарды қолдану, сондай-ақ ең аз мөлшердегі майлау немесе майлау-салқындатқыш сұйықтықтарды

пайдалану өңделген беттің жоғары сапасын қамтамасыз етеді, кескіш құралдың пайдалану мерзімін ұзартады, кесу процесі кезінде туындайтын жылулық жүктемелерге төзімділікті арттырады және жоғары жылдамдықты фрезерлеу барысында жылу бөлінуін азайтады. Нәтижесінде өңделген беттің сапасы жақсарып, өңдеу процестің тұрақтылығы артады.

Қолданыстағы механикалық өңдеу режимдерінің параметрлерін оңтайландыру мақсатында әлемдік тәжірибеде экспериментті жоспарлау әдістері мен жауап беті әдіснамасы кеңінен қолданылады. Бұл әдістердің негізгі мақсаты (Drafer, 1992) – тәжірибелердің ең аз санын пайдалана отырып, нәтижелердің жоғары статистикалық сенімділігін сақтай отырып, процестің эмпирикалық моделін құру болып табылады. Өңдеу сапасы өзара әрекеттесетін әрі бір-бірімен байланысқан көптеген факторлардың жиынтық әсерімен анықталатындықтан, аталған әдістер процестің математикалық моделін құруға, әсер етуші негізгі факторларды анықтауға, олардың өзара ықпалдасу дәрежесін бағалауға және өңдеу режимдерін оңтайлы параметрлерін белгілеуге мүмкіндік береді.

Экспериментті жоспарлау әдісіне негізделген, механикалық өңдеу процестерінің сипаттайтын статистикалық тұрғыдан негізделген математикалық регрессиялық модельдері әзірлеу және оларды материал бетінің сапа көрсеткіштерін болжау мен оңтайландыру үшін пайдалану қазіргі таңда өзекті ғылыми бағыттардың бірі болып табылады (Chen H.-Y. және Chen C. (2025)).

Орындалған жұмыстың мақсаты – BT1-0 титаның жоғары жылдамдықпен фрезерлеу кезінде кесу режимдерінің өңдеу сапасының негізгі көрсеткіштеріне, атап айтқанда қаттылыққа (HB) және беттің кедір-бұдырлығына (Ra) әсерін зерттеу, сондай-ақ экспериментті жоспарлау әдістері негізінде регрессиялық модельдерді құру.

Зерттеудің негізгі міндеттері: кесу режимдерінің бет сапасына әсерін сипаттайтын математикалық регрессиялық модельдерді құру және алынған моделдердің сәйкестігін (верификациясын) жүргізу; температуралық және деформациялық параметрлерді анықтау мақсатында компьютерлік модельдеу жүргізу.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

Зерттеу материалы ретінде МемСТ 19807-91 талаптарына сәйкес техникалық таза титан болып табылатын BT1-0 маркалы титан қолданылады (1-сурет). Эксперименттік зерттеулерді жүргізу үшін шпиндельдің айналу жиілігі (айн/мин), беріліс жылдамдығы S (мм/мин) және кесу тереңдігі (мм) факторларын қамтитын толық факторлық эксперимент әдісі пайдаланылды. Зерттеу жоспары 2^3 толық факторлық экспериментке негізделіп, факторлардың өзара әсері де ескерілді. Оңтайландыру критерийлері ретінде BT1-0 титан қорытпасын жоғары жылдамдықты бүйірлік фрезерлеуден кейін өңделген бет сапасының көрсеткіштері, атап айтқанда қаттылығы (HB) мен кедір-бұдырлығы (Ra) қабылданды.



1-сурет. BT1-0 титан үлгісі

Ескерту – авторлар құрастырған

Фрезерлеу диаметрі 80 мм болатын вольфрам карбидінен жасалған қатты қорытпалы кескіш пластиналармен жабдықталған бүйірлік фрезаны пайдалану арқылы, Siemens SINUMERIK сандық бағдарламалық басқару жүйесімен жабдықталған жоғары дәлдікті V-Center P76 тік өңдеу орталығында жүргізілді (2-сурет). Өңделген титан

үлгілерінің беткі қабатының қаттылығын (НВ) анықтау үшін Бринелль әдісі бойынша жұмыс істейтін ТКМ-439 ультрадыбыстық қаттылық өлшегіші қолданылды. Ал өңделген беттің кедір-бұдырлығы өлшеу үшін TP110 профилометрі пайдаланылды.



2-сурет. V-Center P76 станогында жоғары жылдамдықты фрезерлеу процесі
Ескерту – авторлар құрастырған

1-кестеде экспериментті жоспарлау кезінде өзгермелі факторлардың параметрлері келтірілген.

1-кесте. Өзгермелі факторлардың параметрлері

Факторлар	Жоғарғы деңгей	Төменгі деңгей	Негізгі деңгей	Өзгермелі интервал	Кодталған айнымалының натуралды мәнмен байланысы
x_1	12000	5000	8500	3500	$x_1 = \frac{n - 8500}{3500}$
x_2	3500	500	2000	1500	$x_2 = \frac{S - 2000}{1500}$
x_3	2	0,5	1,25	0,75	$x_3 = \frac{t - 1,25}{0,75}$

Ескерту – авторлар құрастырған

Факторлар деңгейлеріне кодтау жүргізіліп, тәжірибелерді жүргізу шарттары жоспарлау матрицасында тіркелді (2-кесте). Тәжірибелерді орындау барысында рандомизация кездесок сандар әдісін қолдану арқылы жүзеге асырылды. Әрбір өлшеу үш рет қайталанып, алынған нәтижелер бойынша жолдық орташа мәндер есептелді.

2-кесте. 2^3 жоспарлау матрицасы

Тәжірибе №	Факторлар						Кедір-бұдырлығы y_{Ra}	Қаттылық y_{HB}
	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3		
1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	1,50;1,65;1,40	268;267;273
2	+1	-1	-1	-1	-1	+1	1,15;1,20;1,40	326;324;322
3	-1	+1	-1	-1	+1	-1	2,60;2,30;2,30	302;306;307
4	+1	+1	-1	+1	-1	-1	1,45;1,50;1,40	334;339;338
5	-1	-1	+1	+1	-1	-1	1,70;1,20;1,10	262;257;255
6	+1	-1	+1	-1	+1	-1	1,02;1,10;1,25	315;318;321
7	-1	+1	+1	-1	-1	+1	3,10;2,80;2,70	292;298;292
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	2,55;1,90;2,30	327;328;328

Ескерту – авторлар құрастырған

Одан кейін жалпы формула бойынша регрессиялық теңдеу коэффициенттері есептелді:

$$B_q = \frac{\sum_{i=1}^N x_{iq} \bar{y}_i}{N}; q = 0 \dots n.$$

Нәтижесінде келесі коэффициенттер алынды: $b_0 = 1,78$; $b_1 = -0,25$; $b_2 = 0,46$; $b_3 = 0,13$; $b_4 = -0,14$; $b_5 = 0,056$; $b_6 = 0,19$.

Тәжірибелер жүргізілгеннен кейін алынған нәтижелерге статистикалық өңдеу жүргізілді. Алдымен қайталанатын (параллельді) тәжірибелердің қателіктері анықталды. Орташа квадраттық ауытқу өрнек бойынша есептелді:

$$S_i^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y}_i)^2,$$

мұндағы $\bar{y}_i$ – қайталанатын тәжірибелердің үш сериясынан оңтайландыру параметрінің орташа арифметикалық мәні (2-кесте). Есептеу нәтижелері 3-кестеде келтірілген.

3-кесте. Орташа квадраттық ауытқуды есептеу нәтижелері

Тәжірибе нөмірі	1	2	3	4	5	6	7	8
S_i^2	0,0317	0,0175	0,06	0,005	0,1933	0,0133	0,0867	0,1275
Ескерту – авторлар құрастырған								

Тәжірибе қателігінің дисперсиясы және коэффициенттердің орташа квадраттық ауытқулары да анықталды:

$$S_{\{y\}}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i^2 \approx 0,0334,$$

$$S_{\text{коэф}} = \sqrt{\frac{S_{\{y\}}^2}{n \cdot m}} = \sqrt{\frac{0,0334}{8 \cdot 3}} \approx 0,04.$$

Стъюдент үлестірімінің анықтамалық кестелерінен еркіндік дәрежелерінің саны $n \cdot (m - 1) = 8 \cdot 2 = 16$ және маңыздылық деңгейі $\alpha = 0,05$ үшін критикалық мән $t_{\text{кр}} = 2,12$ анықталды. Осыдан кейін $t_{\text{кр}} \cdot S_{\text{коэф}} = 2,12 \cdot 0,04 = 0,0848 \approx 0,085$ мәні есептелді. Демек, b_5 -тен басқа барлық коэффициенттер мәнді болып табылады, себебі абсолюттік мәндері 0,085-тен жоғары. $b_5 = 0$ деп қабылдай отырып, кодталған айнымалылардағы регрессиялық теңдеудің соңғы түрі алынды:

$$Y_{\text{Ra}} = 1,78 - 0,25 \cdot x_1 + 0,46 \cdot x_2 + 0,13 \cdot x_3 - 0,14 \cdot x_1 x_2 + 0,19 \cdot x_2 x_3.$$

Алынған теңдеуді адекваттылығын тексеру Фишер критерийі (F) бойынша жүргізілді, ол үшін қосымша қалдық дисперсиясы $S_{\text{ост}}^2$ есептелді:

$$S_{\text{ост}}^2 = \frac{m}{n-r} \sum_{j=1}^n (y_j - \bar{y}_j)^2 \approx 0,0467.$$

мұндағы n – эксперименттер саны;

m – әр эксперименттегі тәжірибелер саны;

r – регрессия теңдеуіндегі маңызды коэффициенттер саны;

y_j – j -ші эксперимент үшін маңызды коэффициенттері бар регрессия теңдеуімен

есептелген зерттелетін параметрдің мәні;

$\bar{y}_j$ – жауап функциясы үшін бақылаулардың орташа таңдамалы мәні.

Фишер критерийі мәнін есептейміз:

$$F_{расч} = \frac{S_{ост}^2}{S_{\{y\}}^2} = \frac{0,0467}{0,0334} = 1,397 \approx 1,4.$$

Фишер критерийінің кестелік мәні $F_{крит} = 3,63$ Фишер үлестірімінің критикалық нүктелерінің анықтамалық кестелерінен $\alpha = 0,05$ маңыздылық деңгейі және сәйкес еркіндік дәрежелері $k_1 = n - r = 8 - 7 = 1$ және $k_2 = n(m - 1) = 8 \cdot 2 = 16$ бойынша анықталды.

$F_{расч} < F_{крит}$ болғандықтан, алынған регрессиялық моделі зерттеліп отырған процесті адекватты түрде сипаттайды. Кодталған айнымалыларды натурал мәндерге түрлендіргеннен кейін (1-кесте) келесі теңдеу алынды:

$$Ra = 1,51346 - 1,60714 \cdot 10^{-5} \cdot n + 3,29034 \cdot 10^{-4} \cdot S - 0,16759 \cdot t - 2,73810 \cdot 10^{-8} \cdot n \cdot S + 1,68519 \cdot 10^{-4} \cdot S \cdot t.$$

Моделдің адекваттылығын тексеру мақсатында қалдықтарға талдау жүргізілді. Қалдықтардың орташа мәні нөлге тең ($\bar{e} = 0$), бұл есептік мәндердің эксперименттік нәтижелерге қатысты жүйелі ығысуының жоқ екенін көрсетеді. Қалдықтардың орташа квадраттық ауытқуы 0,06674 мәнін құрайды, ал есептік мәнің эксперименттік мәнен максималды ауытқуы 0,08333 мкм-ден аспайды. Демек, аппроксимация төмен деңгейде. Детерминация коэффициенті $R^2 = 0,9889$ регрессиялық теңдеудің жауап көрсеткішінің жалпы өзгергіштігінің 98,9 %-ын түсіндіретінін көрсетеді. Алынған математикалық модель эксперименттік деректерді жеткілікті толық сипаттайды, бұл түзетілген детерминация коэффициентінің $R^2 = 0,9610$ мәнімен расталады. Осыған байланысты аталған модель әрі қарай зерттелетін факторлардың әсерін талдау үшін пайдаланылуы мүмкін.

Стандартталған қалдықтарды талдау нәтижесінде олардың мәндері $-1,335$ -тен $1,335$ аралығында орналасқаны анықталды, бұл рұқсат етілген ± 2 шегінен аспайды және шеткі мәндер мен аномальді бақылаулардың жоқ екенін көрсетеді. Қалдықтардың таралуының қалыптшылығын Шапиро-Уилк критерийі бойынша тексеру ($W = 0,8952$; $p = 0,2613$) қалыпты таралу заңынан статистикалық тұрғыдан маңызды ауытқуларды анықтаған жоқ. Алынған нәтижелер регрессиялық талдаудың негізгі алғышарттарының орындалатынын растайды және құрылған математикалық моделдің адекваттылығын дәлелдейді.

Регрессиялық теңдеу коэффициенттерінің талдауы ең күшті әсерді беріліс шамасы көрсететінін анықтады, себебі оның абсолюттік мәні ең жоғары болып табылады. Одан кейін өңделген бет кедір-бұдырлығына әсер ету дәрежесінің төмендеу реті бойынша факторлар келесідей орналасады: шпиндельдің айналу жиілігі, жұптық өзара әрекеттесуі $x_2 x_3$, одан кейін $x_1 x_2$ өзара әсері және кесу тереңдігі. x_1 коэффициентінің теріс таңбалы болуы осы фактордың мәні артқан сайын жауап функциясының мәні төмендейтінін көрсетеді. Ал x_2 және x_3 коэффициенттері оң мәнге ие болғандықтан, аталған факторлардың мәндері артқан сайын жауап функциясының мәні де жоғарылайтынын білдіреді.

Сол сияқты, кесу режимі параметрлерінің бетінің қаттылығына (НВ) әсерін есептеу және анықтау жүргізілді.

Келесі нәтижелер келтірілді: регрессия теңдеуінің коэффициенттері: $b_0 = 304,13$; $b_1 = 22,54$; $b_2 = 11,79$; $b_3 = -4,71$; $b_{12} = -6,13$; $b_{13} = 0,89$; $b_{23} = -0,38$; қателік дисперсиясы: $S_{\{y\}}^2 \approx 0,7833$; коэффициенттердің орташа квадраттық ауытқуы: $S_{коэф} \approx 0,5713$; маңыздылық шегі $t_{кр} \cdot S_{коэф} \approx 1,211$; қалдықты дисперсиясы: $S_{ост}^2 = 8,93$; Фишер критериясы $F_{крит} = 3,24$ и $F_{расч} = 1,14$. Егер $F_{расч} < F_{крит}$ болса, онда теңдеу факторлардың өзгеруінің осы диапазонында зерттелетін процесті сипаттайды. Шамалы коэффициенттерді қоспағанда $b_{13} = 0,89$ және $b_{23} = -0,38$, соңғы теңдеу алынады:

$$Y_{НВ} = 304,13 + 22,54 \cdot x_1 + 11,79 \cdot x_2 - 4,71 \cdot x_3 - 6,13 \cdot x_1 \cdot x_2.$$

Бет қаттылығын арттыратын факторлар шпиндельдің айналу жиілігі (n)– x_1 және беріліс шамасы (S) – x_2 жатады. x_3 факторы (кесу тереңдігі t) бет қаттылығына төмендетуші

әсер етеді. Бұл ретте ең жоғарғы беріктену екі беріктендіруші фактордың $x_1 \times x_2$ өзара әсерімен шектеледі, себебі жоғары жылдамдықты өңдеу режимдерінде жылулық жұмсару құбылысы арқылы тойтару әсерінен алынатын жалпы беріктену әсерін біршама төмендетуі мүмкін.

Түрлендірулерді орындау нәтижесінде натуралды айнымалылардағы келесі регрессиялық теңдеу алынды:

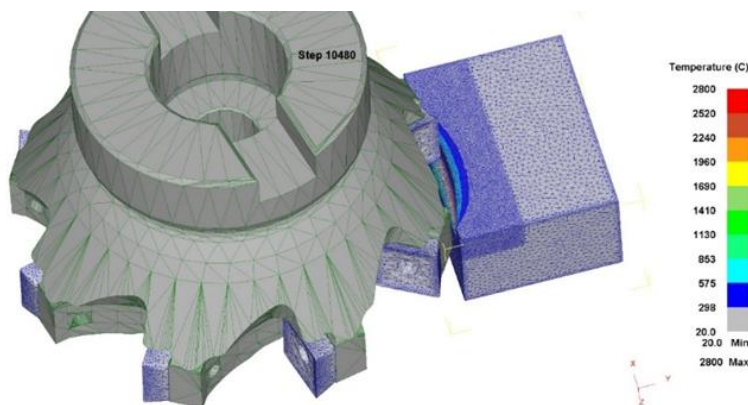
$$HB = 251,5 + 0,01157 \cdot n + 0,01156 \cdot S + 8,26 \cdot t - 1,16 \cdot 10^{-6} \cdot n \cdot S.$$

Қалдықтарды талдау жүйелі қателіктің жоқ екенін көрсетті: қалдықтардың орташа мәні нөлге тең, ал есептік мәндердің эксперименттік нәтижелерден максималды ауытқуы 0,375 HB бірлігін құрайды. Детерминация коэффициентінің жоғары мәні ($R^2 = 0,9998$) регрессиялық теңдеудің жауап көрсеткішінің жалпы вариациясы 99,9 %-ын көрсетеді. Алынған математикалық моделі эксперименттік деректерді жеткілікті толық сипаттайды, бұл түзетілген детерминация коэффициентінің $R^2=0,9610$ мәнімен расталады. Осыған байланысты аталған модель әрі қарай зерттелетін факторлардың әсерін талдау үшін пайдаланылуы мүмкін.

Компьютерлік модельдеудің дамуымен эксперименттік нәтижелермен корреляцияланған имитациялық зерттеулер кеңінен қолданыла бастады (Deeranraaj және басқ., (2022)). Математикалық модельдеу инженерлік міндеттерді талдаудың маңызды құрамдас бөлігі болып табылады, бұл ретте ең бейімделгіш және әмбебап әдістердің бірі ретінде соңғы элементтер әдісі танылған. Соңғы элементтер әдісін қолдану арқылы жүргізілген модельдеу жонқа морфологиясын, кесу күшін, кернеулерді, деформацияларды, сондай-ақ өңделетін дайындама мен кескіш құралдағы температуралық өрістерді анықтауға мүмкіндік береді (Mathivanan және басқалары, 2022).

Бұл зерттеуде өңдеу параметрлерінің әртүрлі комбинациялары жағдайында титан материалын бүйірлік фрезерлеу арқылы өңдеу процесін модельдеу үшін Machining модулі бар Deform-3D бағдарламалық кешені қолданылды. Модельдеу нәтижесінде деформациялар, кернеулер, дайындама мен кескіш құралдың температуралық көрсеткіштері анықталды.

Бүйірлік фрезаның қатты қорытпалы кескіш пластинасының дайындамамен жанасу кезінде үшөлшемді моделі 3-суретте келтірілген.



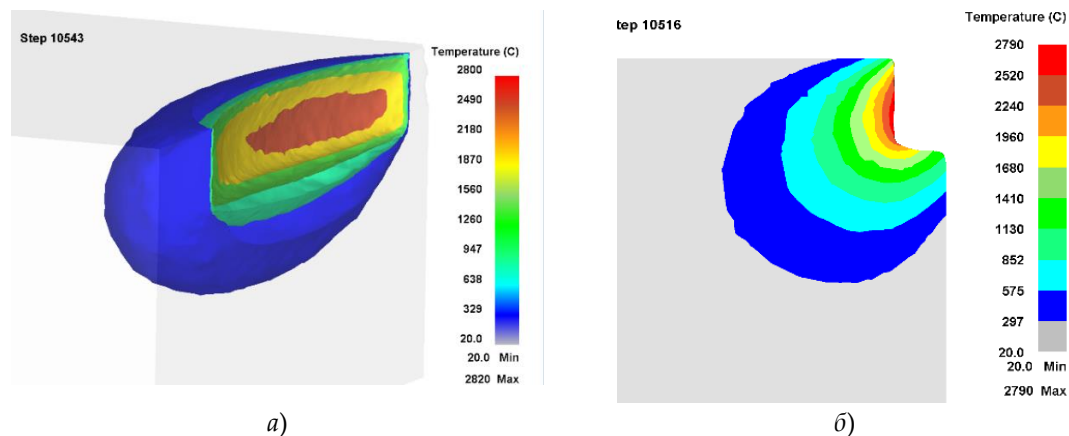
3-сурет. Үш өлшемді шектік фрезерлеу моделі

Ескерту – авторлар құрастырған

Deform 3D Machining бағдарламалық кешенінде бүйірлік фрезамен өңдеу нәтижесінде алынған кернеулі-деформациялық күйдің әртүрлі көрсеткіштері мен температуралық таралуы көрсетілген дайындама және кескіш пластиналардың модельдері

үшөлшемді моделдеу жүйесі Компас 2D/3D бағдарламасына импортталды. Аталған жүйенің көмегімен температура, деформация және басқа да көрсеткіштердің таралу аймақтарындағы шекаралар (нүктелер) арасындағы қашықтықтар өлшенді, сондай-ақ көрсеткіштер мәндерінің аралықтарына байланысты олардың таралу тереңдігі анықталды.

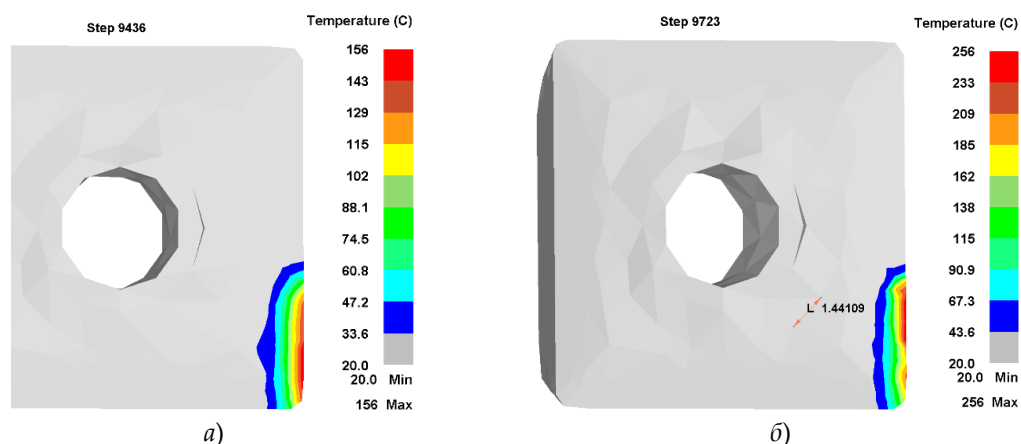
Ғалымдардың практикалық зерттеулері (Ulutan, 2009; Yan, 2025; Phokobye, 2024; Gutzeit, 2023) құрал мен дайындамадағы жылудың таралу мәселелеріне бағытталған. Бұл процесстер кескіш құралдың тозуына және өңделетін бет сапасының төмендеуіне алып келеді. Осыған байланысты кесу процесін оңтайландыру мақсатында температуралық өрістерді модельдеу өзекті міндеттердің бірі болып табылады. 4-суретте модельдеудің бір қадамындағы дайындама көлемі бойынша температураның таралуы жалпы көріністе (а) және көлденең қималардың бірінде (б) көрсетілген.



4-сурет. Модельдеу кезінде дайындама көлеміндегі температураның таралуы:
жалпы көріністе тереңдік бойынша (а) және көлденең қимада (б)

Ескерту – авторлар құрастырған

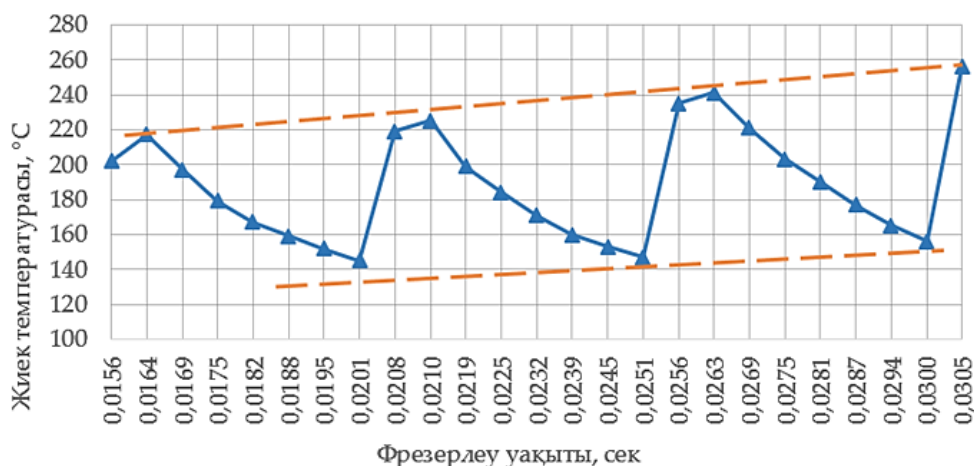
5-суретте бүйірлік фрезаның бірдей қатты қорытпалы кескіш пластинасының көлемі бойынша температураның таралуы көрсетілген. Модельдеудің осы қадамында кескіш пластина фрезаның толық айналымының соңында (а) кесу процесі басталар алдындағы күйде және дайындамамен жанасып, кесу операциясын (б) орындау кезіндегі күйде орналасқан.



5-сурет. Дайындамамен жанасу алдында (а) және жанасу кезінде (б) кесу пластинасының көлемінде температураның таралуы

Ескерту – авторлар құрастырған

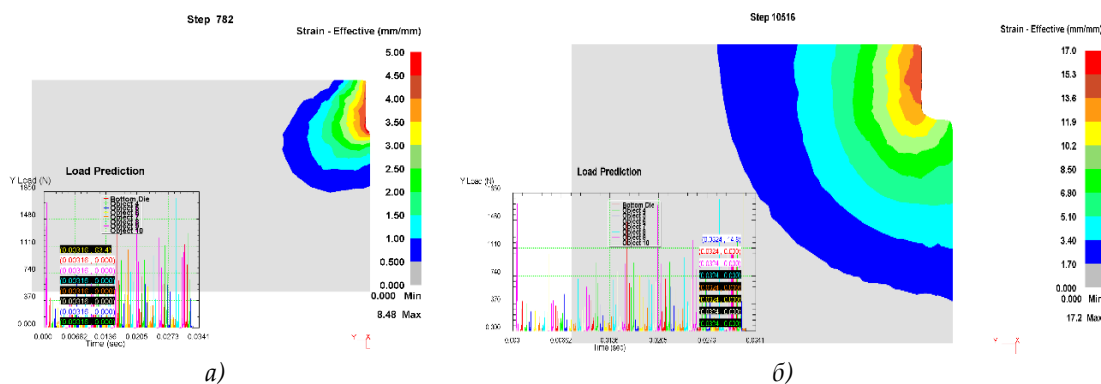
6-суретте Deform 3D бағдарламалық кешенінде жүргізілген модельдеу нәтижелері бойынша тұрғызылған, кескіштің бірнеше айналымы кезеңіндегі бірдей қатты қорытпалы кескіш пластинаның кесу жиегіндегі максималды температураның өзгеру графигі көрсетілген. Графиктен дайындамамен жанасу кезінде үйкеліс әсерінен фреза пластинасының қызатыны, ал дайындамамен жанасу аймағынан шыққаннан кейін майлау-салқындатқыш сұйықтың әсерінен қарқынды түрде салқындай бастайтыны байқалады. Бұл ретте температураның төмендеуі орта есеппен 75-90°C аралығында болады.



6-сурет. Шектік фрезерлеу процесінде қатты қорытпалы пластинаның кесу жиегінің температурасының өзгерісі

Ескерту – авторлар құрастырған

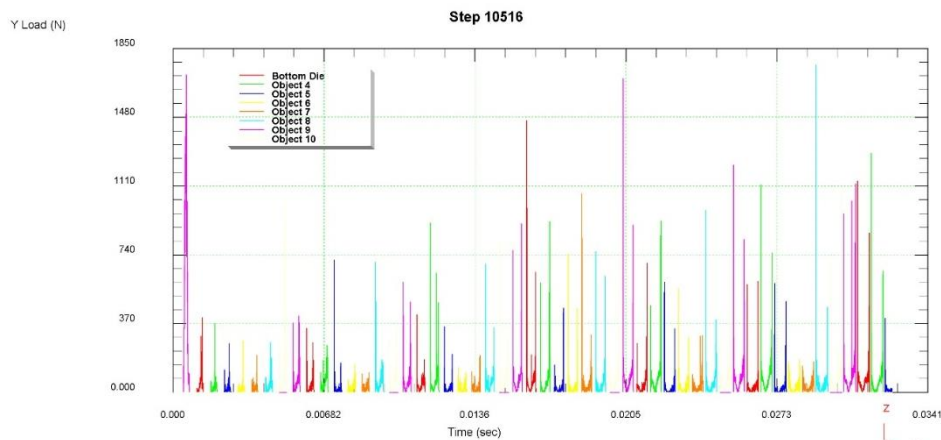
7-суретте кесу аймағынан дайындама көлемнің тереңдігіне қарай деформациялардың таралуы көрсетілген. Деформациялар құралдың қозғалу бағыты бойынша жинақталады және кесу процестің бастапқы кезеңінде негізінен дайындаманың соңғы бөлігінде (а) қарқынды дамиды, ал өңдеу уақыты ұлғайған сайын деформациялар кескіштің алдындағы (б) дайындаманың жоғарғы беті бойынша белсендірек таралады. Бұл құбылыс кесу күштерінің әсерімен және кесілетін металл бөлшектерінің (жонқаның) бөліну процесімен байланысты екенін көрсетеді. Дайындаманың беткі қабатындағы деформациялардың максималды шамасы мен таралу тереңдігі беттік қабаттың ықтимал беріктену дәрежесін бағалауға мүмкіндік береді.



7-сурет. Тиімді деформацияның таралуы

Ескерту – авторлар құрастырған

8-суретте бүйірлік кескіштің барлық қатты қорытпалы кескіш пластинкалармен бірнеше айналым барысында кесу күштерінің өзгеру графигі көрсетілген.



8-сурет. Кесу күштерінің өзгеруі

Ескерту – авторлар құрастырған

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

BT1-0 маркалы таза титан дайындамаларын жоғары жылдамдықпен фрезерлеу бойынша жүргізілген эксперименттік зерттеу нәтижесінде беріліс жылдамдығы, кесу тереңдігі және шпиндельдің айналу жиілігі параметрлерінің кең ауқымда өзгеруі жағдайында регрессиялық модельдер алынды. Бұл модельдер кесу режимдерінің бөлшек бетінің сапасына әсерін сипаттайды.

Өңдеу режимдері шпиндельдің айналу жиілігінде 3500-ден 12000 айн/мин дейін, ал беріліс жылдамдығы 500-ден 5000 мм/мин дейін белгіленеді және кесу тереңдігі 0,5-тен 2 мм-ге дейін аралығын құрады. Бет кедір-бұдырлығына ең үлкен әсер беріліс жылдамдығы мен шпиндельдің айналу жиілігі көрсетеді. Беріліс мәнінің артуымен беттің кедір-бұдырлығы төмендейді, ал қаттылыққа шпиндельдің айналу жылдамдығы әсер етеді, оның жоғарлауымен материалдың қаттылығы артады.

Модельдердің адекваттылығы алынған нәтижелерді статистикалық өңдеу әдістері арқылы анықталды. Стьюдент критерийі регрессия теңдеуіндегі мәнді емес коэффициенттерді анықтады. Беттің кедір-бұдырлығын анықтау кезінде мәнді емес коэффициент ретінде x_1x_3 өзара әрекеттесу коэффициенті анықталды. Фишер критерийі бойынша жүргізілген тексеру есептік деректердің эксперименттік нәтижелерге сәйкес келетінін көрсетті. Қателік 5%-дан төмен болды, бұл техникалық есептеулер үшін рұқсат етілетін шама болып табылады. Қалдықтарды талдау жүйелі қателіктің жоқ екенін көрсетті, бұл алынған модельдердің жоғары сенімділігін көрсетеді.

Қаттылықты анықтау кезінде x_1x_3 және x_2x_3 өзара әрекеттесу коэффициенттері мәнсіз деп танылды. Фишер критерийі бойынша жүргізілген бағалау есептік деректердің эксперименттік нәтижелерге сәйкес келетінін көрсетті. Қателік 7%-дан төмен болды, бұл техникалық есептеулер үшін толықтай рұқсат етілетін шама. Қалдықтарды талдау жүйелі қателіктің жоқ екенін көрсетті, бұл алынған модельдердің жоғары сенімділігін дәлелдейді.

Эксперименттік нәтижелер беріліс жылдамдығының артуы беттің кедір-бұдырлығының жоғарлайтынын көрсетті, себебі бұл кезде кесілетін қабаттың қалыңдығы ұлғайып, құралдың кесу жиегі қалыптасатын микротегіссіздіктердің биіктігі артады. Өз кезегінде, шпиндельдің айналу жиілігінің жоғарлауы өңделген беттің кедір-бұдырлығын төмендеуіне ықпал етеді, өйткені кесу процесі тұрақтанып, кескіш құралда жиек түзілу ықтималдығы азаяды. Кесу тереңдігінің артуы кезінде құралға түсетін жүктеме жоғарылап,

бет қалыптасу жағдайлары нашарлайды. Мұндай заңдылықтар Kar және басқ., (2020), Wang және басқ., (2020), сондай-ақ Phokobye және басқ., (2024) еңбектерінде де көрсетілген. Аталған зерттеулер титан қорытпаларын жоғары жылдамдықпен фрезерлеу кезінде өңделген бет сапасына беріліс жылдамдығының әсері көрсетілген.

Бет қаттылығының өзгеруін зерттеу барысында шпиндельдің айналу жиілігі мен беріліс жылдамдығының жоғарылауы материалдың пластикалық деформациясы және тойтарма қабатының түзілуі нәтижесінде беткі қабат қаттылығының артуына ықпал ететіні анықталды. Сонымен қатар, кесу тереңдігінің ұлғаюы өңдеу аймағындағы температураның жоғарылауымен қатар жүреді, бұл беткі қабаттың беріктену әсерін ішінара төмендетеді.

Жоғары жылдамдықты фрезерлеуді модельдеу арқылы кесу аймағындағы температураның және деформациялардың таралуы, кесу күштерінің өзгеруі, сондай-ақ кескін құралдағы температураның өзгеру заңдылықтары зерттелді. Суреттерден температураның дайындамамен жанасу аймағынан материал ішіне қарай бағытталаыны байқалды. Фреза мен дайындаманың жанасу аймағында температура титанның балку температурасынан жоғары мәндерге жетуі мүмкін.

Температураның таралуы дайындаманың фрезамен жанасу аймағында металдың шағын учаскесінің қысқа уақыт ішінде 2800°C -тан жоғары температураға дейін қызатынын көрсетеді. Бұл кесіліп алынатын металл бөлшектерінің ішінара балкуына және олардың дайындамадан жеңіл бөлінуіне әкеледі. Алайда бұл құбылыс белгілі бір дәрежеде олардың құралдың кесу жиегіне және дайындаманың шетіне жабысып қалуына ықпал етеді, нәтижесінде «қатпар» түзіледі. Сонымен қатар 4-суретте ішкі қабаттармен салыстырғанда беткі қабаттардың айқын салқындауы байқалады. Бұл құбылысты жоғары жылдамдықты механикалық өңдеу әдістерінде майлау-салқындату сұйықтығын міндетті түрде қолданумен түсіндіруге болады. Дайындаманың ашық сыртқы бетінде жылу беру процесі қарқынды жүретіндіктен, оның температурасы ішкі бөліктерімен салыстырғанда біршама төмендейді.

Фрезерлеу барысында қатты қорытпалы пластинаның кесу жиегіндегі температураны талдау нәтижесінде дайындамамен жанасу аймағынан шыққаннан кейін майлау-салқындату сұйықтығы әсерінен оның қарқынды салқындауы байқалады. Температураның төмендеуі орта есеппен $75-90^{\circ}\text{C}$ құрайды.

Деформация фрезаның әрбір айналымы кезінде де арта түседі. Ол құралдың қозғалу бағыты бойынша жинақталып, фрезаның дайындама материалына енуіне қарай деформацияның дамуы жалғасады. Бұл құбылыс кесу күштеріне және кесіліп алынатын металл бөлшектерінің (жоңқаның) бөліну процесіне тәуелділігін көрсетеді. Деформацияның максималды шамасы алынатын қабатта шоғырланады, бұл беткі қабаттың ықтимал беріктену дәрежесін бағалауға мүмкіндік береді. Өз кезегінде, бұл құралдың тозуына және өңделген бет сапасының қалыптасуына әсер етеді. Титан қорытпаларын жоғары жылдамдықпен фрезерлеу кезінде деформацияның локализациялануы өңдеуі қиын материалдарға тән сегметтелген жоңқаның түзілуіне ықпал етеді.

8-суреттегі графиктен көрініп тұрғандай, кейбір айналымдарда кесу күштері $1,5\text{ кН}$ -нан асады, алайда орташа күш шамасы $0,74-1,11\text{ кН}$ аралығында өзгереді. Күш шамасының айқын секірмелі өзгерістері байқалады, бұл соңғы элементтер торының қайта құрылуымен және металл қабатының жоңқаға үзіліп бөлінуімен байланысты.

Нәтижесінде әзірленген регрессиялық модельдер өз дұрыстығын көрсетті және BT1-0 маркалы материал мен зерттелген кесу режимдері ауқымында қолдануға жарамды. Титан маркасы, құрал геометриясы немесе салқындату шарттары өзгерген жағдайда, модельдердің қолданылу мүмкіндігін растау үшін қосымша эксперименттік тексерулер жүргізу қажет.

Осылайша, жүргізілген зерттеу нәтижелері BT1-0 маркалы титанды жоғары жылдамдықты бұйырлық фрезерлеу кезінде бет сапасының қалыптасу заңдылықтарын анықтауға, сондай-ақ эксперименттерді жоспарлау әдістері мен компьютерлік модельдеуді кешенді түрде қолданудың тиімділігін растауға мүмкіндік берді. Алынған нәтижелер өңдеудің оңтайлы режимдерін таңдау, титанның жасалған бөлшектерді дайындаудың технологиялық процестерін әзірлеу, сондай-ақ жоғары жылдамдықты фрезерлеу процесінің математикалық модельдерін одан әрі жетілдіру барысында пайдаланылуы мүмкін.

ҚОРЫТЫНДЫ

BT1-0 маркалы титанды жоғары жылдамдықты фрезерлеу бойынша жүргізілген зерттеулер нәтижесінде эксперименттерді жоспарлау әдістері, математикалық модельдеу және эксперименттік верификация тәсілдері қолданылып, кесу режимдерінің бет сапасының көрсеткіштеріне әсер ету заңдылықтары анықталды. Әзірленген математикалық регрессиялық модельдер шпиндельдің айналу жиілігінің, беру шамасының және кесу тереңдігінің өңделген бетінің кедір-бұдырлығы мен қаттылығына әсерін, сондай-ақ олардың өзара байланысын сипаттайды. Модельдерге статистикалық тексеру жүргізіліп, қателік шамасы есептелді. Оның мәні 10%-дан аспайды, бұл жүргізілген зерттеу нәтижелерінің дұрыстығын көрсетеді. Deform-3D Machining бағдарламалық кешенінде өңдеу процесін компьютерлік модельдеу кесу аймағындағы температураның таралуы және оның дайындаманың терең қабаттарына берілуі бойынша нәтижелер алуға мүмкіндік берді. Кесу процесі барысында деформацияның шамасы да артады, алайда деформация негізінен кесіліп алынатын қабатта таралады, ал дайындаманың ішкі қабаттарына қарай оның таралу қарқындылығы төмендейді.

Регрессиялық модельдердің нәтижелері беткі қабаттың кедір-бұдырлығы шпиндельдің айналу жиілігі мен кесу тереңдігіне қарағанда беру шамасына көбірек тәуелді екенін көрсетті. Сонымен қатар беру шамасы мен кесу тереңдігі артқан сайын беткі қабаттың кедір-бұдырлығы да жоғарылайды. Бөлшектердің талап етілетін пайдалану сипаттамаларын қамтамасыз ету үшін өңдеудің технологиялық параметрлерін таңдау кезінде кесу режимдерінің өзгеруін ескеру қажет. Аталған регрессиялық модельдер Стюдент және Фишер критерийлері бойынша адекваттылық тексеріліп, өз дұрыстығын растады. Сонымен қатар қалдықтарды есептеу жүргізілді, оның нәтижелері ауытқулардың жоқ екенін көрсетті.

Осылайша беткі қабаттың кедір-бұдырлығының ең төменгі мәні шпиндельдің айналу жылдамдығы максималды мәнге (1200 айн/мин) және кесу тереңдігі 2 мм-ге тең болғанда, ал беру шамасы минималды мәнде (500 мм/мин) болған жағдайда байқалады. Құрылған модельдер зерттелген өңдеу режимдері диапазонында, пайдаланылған жабдық пен құрал жағдайында, сондай-ақ BT1-0 маркалы титан үшін қолдануға жарамды.

Мақалада BT1-0 маркалы техникалық таза титанды жоғары жылдамдықты фрезерлеу процесін зерттеуге кешенді тәсіл қолданылған. Зерттеу барысында кесу режимдерінің параметрлерінің бет сапасына әсерін анықтайтын регрессия теңдеуін құру мақсатында эксперименттерді жоспарлау әдісі, сондай-ақ температура мен деформацияны анықтау үшін сандық модельдеу әдісі қолданылды.

Алынған математикалық модельдерді BT1-0 маркалы титан бөлшектерін жоғары жылдамдықпен фрезерлеудің оңтайлы режимдерін анықтау үшін пайдалану өңделген бет сапасының көрсеткіштерін болжауға және қымбат эксперименттік зерттеулердің көлемін қысқартуға мүмкіндік береді.

Болашақтағы зерттеулер барысында факторлардың вариациялану ауқымын кеңейту, кесу құралының геометриясының, заманауи тозуға төзімді жабындардың өңдеу сапасының көрсеткіштері мен құралдың тозуына әсерін ескере отырып, регрессиялық модельдерді

құру мүмкіндіктерін зерттеу жоспарлануда. Сонымен қатар титан қорытпаларын жоғары жылдамдықпен фрезерлеу процесінің параметрлерін болжау дәлдігін арттыру және оңтайландырудың кешенді модельдерін әзірлеу мақсатында эксперименттік деректер мен соңғы элементтер әдісімен модельдеу нәтижелерін біріктіру көзделеді.

МҮДДЕЛЕР ҚАЙШЫЛЫҒЫ: мүдделер қақтығысы жоқ.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ: Бұл мақала «Жоғары жылдамдықты өңдеу технологиясын жетілдіру есебінен титан қорытпаларынан бөлшектерді дайындау сапасын арттыру» AP26100423 тақырыбы бойынша Ғылым және жоғары білім министрлігінің ғылыми зерттеулерге арналған гранттық қаржыландыру жобасы аясында дайындалды.

ИНСТИТУЦИОНАЛДЫҚ ЭТИКА КОМИТЕТІНІҢ ҚОРЫТЫНДЫСЫ:

Қолданылмайды.

ЕРІКТІ КЕЛІСІМ ТУРАЛЫ МӘЛІМДЕМЕ: Қолданылмайды.

АЛҒЫС БІЛДІРУ: Авторлар әдістемелік қолдау мен пайдалы пікірлері үшін әріптестеріне, сондай-ақ мақаланың сапасын арттыруға септігін тигізген анонимді рецензенттерге алғыс білдіреді.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Anil Kumar, V., Gupta, R. K., Prasad, M. J. N. V., & Narayana Murty, S. V. S. (2021). Recent advances in processing of titanium alloys and titanium aluminides for space applications: A review. *Journal of Materials Research*, 36(3), 689–716. <https://doi.org/10.1557/s43578-021-00104-w>
- Chen, H.-Y., & Chen, C. (2025). A study of the response surface methodology model with regression analysis in three fields of engineering. *Applied System Innovation*, 8(4), Article 99. <https://doi.org/10.3390/asi8040099>
- Deepanraj, B. (2022). Numerical modelling, simulation, and analysis of the end-milling process using DEFORM-3D with experimental validation. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022, Article 5692298. <https://doi.org/10.1155/2022/5692298>
- Draper, N. R. (1992). Introduction to Box and Wilson (1951) "On the experimental attainment of optimum conditions." *Springer Series in Statistics*, 267–269. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4380-9_22
- Gutzeit, K., Bulun, G., Stelzer, G., Kirsch, B., Seewig, J., & Aurich, J. C. (2023). Sub-zero milling of Ti-6Al-4V – Impact of the cutting parameters on the resulting forces, tool wear, and surface quality. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 126(7–8), 3367–3381. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11334-z>
- Kar, B. C., Panda, A., Kumar, R., Sahoo, A. K., & Mishra, R. R. (2020). Research trends in high speed milling of metal alloys: A short review. *Materials Today: Proceedings*, 26, 2657–2662. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.559>
- Mathivanan, A., Swaminathan, G., Sivaprakasam, P., Suthan, R., Jayaseelan, V., & Nagaraj, M. (2022). DEFORM 3D simulations and Taguchi analysis in dry turning of 35CND16 steel. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022, Article 7765343. <https://doi.org/10.1155/2022/7765343>
- Matuszak, J., Zaleski, K., & Zyśko, A. (2023). Investigation of the impact of high-speed machining in the milling process of titanium alloy on tool wear, surface layer properties, and fatigue life of the machined object. *Materials*, 16(15), Article 5361. <https://doi.org/10.3390/ma16155361>
- Phokobye, S. N., Desai, D. A., Tlhabadira, I., Sadiku, E. R., & Mutombo, K. (2024). Comparative investigation and optimization of cutting tools performance during milling machining of titanium alloy (Ti6Al4V) using response surface methodology. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 131(7–8), 3565–3577. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13225-3>

- Sivarupan, T., Bermingham, M., Ng, C.-H., Sun, S., & Dargusch, M. (2024). A review of the use of cryogenic coolant during machining titanium alloys. *Sustainable Materials and Technologies*, 40, Article e00946. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2024.e00946>
- Ulutan, D., Lazoğlu, İ., & Dinc, C. (2009). Three-dimensional temperature predictions in machining processes using finite difference method. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(2), 1111–1121. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.03.020>
- Wang, G., Liu, X., Chen, T., & Gao, W. (2020). An experimental study on milling titanium alloy with a revolving cycloid milling cutter. *Applied Sciences*, 10(4), Article 1423. <https://doi.org/10.3390/app10041423>
- Yan, J., Suhaimi, M. A., Sharif, S., Khoo, P. S., & Zhuang, K. (2025). Enhancing tool life and surface quality in high-speed milling of Ti6Al4V: A comparative study of flood and minimum quantity lubrication cooling strategies. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 141(5–6), 3089–3110. <https://doi.org/10.1007/s00170-025-16804-0>
- Zahid, M., Dey, A., & Kundan, N. (2025). Optimized surface engineering of Ti-6Al-4V: Comprehensive coating evaluation for biomedical applications. *Surfaces and Interfaces*, 56, Article 105735. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2024.105735>
- Козлов, В.Н., Чжан, Ц., & Шэ, Л. (2022). Исследование причин плохой обрабатываемости титановых сплавов резанием. *Современные проблемы машиностроения: сборник трудов XV Международной научно-технической конференции* (с. 80–81). Томск: Томский политехнический университет. // Kozlov, V. N., Zhang, C., & She, L. (2022). Issledovanie prichin plokhoy obrabatyvaemosti titanovykh splavov rezaniem [Investigation of the causes of poor machinability of titanium alloys by cutting]. *Sovremennye problemy mashinostroeniya: Sbornik trudov XV Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoj konferentsii* [Proceedings of the XV International Scientific and Technical Conference “Modern Problems of Mechanical Engineering”] (pp. 80–81). Tomsk: Tomsk Polytechnic University. (In Russ.)

Авторлар туралы мәліметтер

Информация об авторах

Information about authors



Айнабекова Сауле Серикбаевна – PhD, қауымдастырылған профессор (доцент), Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау қ., Қазақстан

Айнабекова Сауле Серикбаевна – PhD, ассоциированный профессор (доцент), Карагандинский индустриальный университет, г. Темиртау, Казахстан

Ainabekova Saule Serikbayevna – Doctor of Philosophy, Associate Professor, Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan

e-mail: s.aynabekova@tttu.edu.kz,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7033-2225>



Тусупова Сягуль Ораловна – PhD, Қауымдастырылған профессор (доцент), Торайғыров университеті, Павлодар қ., Қазақстан

Тусупова Сягуль Ораловна – PhD, ассоциированный профессор (доцент), Торайғыров университет, г. Павлодар, Казахстан

Tussupova Sayagul Oralovna – Doctor of Philosophy, Associate Professor, Torajghyrov University, Pavlodar, Kazakhstan

e-mail: tussupova.s@teachers.tou.edu.kz,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8920-4901>



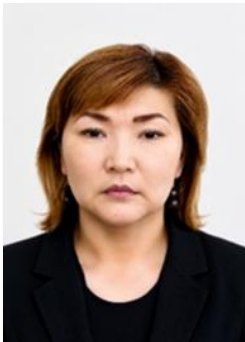
Кузьминова Надежда Юрьевна – техникалық ғылымдар магистрі, Қарағанды индустриалық университеті, Теміртау қ., Қазақстан

Кузьминова Надежда Юрьевна – магистр технических наук, Карагандинский индустриальный университет, г. Темиртау, Казахстан

Kuzminova Nadezhda Yurievna – Master of Technical Sciences, Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan

e-mail: n.kuzminova@tttu.edu.kz

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1705-0405>



Ибраева Акжаркын Елемесовна – техникалық ғылымдар магистрі, Қарағанды индустриалық университеті, Теміртау қ., Қазақстан

Ибраева Акжаркын Елемесовна – магистр технических наук, Карагандинский индустриальный университет, г. Темиртау, Казахстан

Ibraeva Akzharkyn Yelemesovna – Master of Technical Sciences, Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan

e-mail: a.ibraeva@tttu.edu.kz

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6650-122X>